Aus dem Tropenmedizinischen Institut der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. H. J. Knüttgen

Akklimatisation während eines fünfwöchigen Daueraufenthaltes in einem künstlichen trockenheißen Klima

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Peter Schwemmlein
aus München

1969

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547611_0118

Aus dem Tropenmedizinischen Institut der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. H. J. Knüttgen

Akklimatisation während eines fünfwöchigen Daueraufenthaltes in einem künstlichen trockenheißen Klima

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Peter Schwemmlein
aus München

1969

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan: Professor Dr. J. Hirschmann

1. Berichterstatter: Professor Dr. W. Höfler
2. Berichterstatter: Professor Dr. H.J. Knüttgen

FOTODRUCK PRÄZIS Barbara v.Spangenberg KG • Tübingen

In Dankbarkeit meinen lieben Eltern
meiner lieben Schwester Uta
und meinem Schwager Heiner

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

EINLEITUNG 1

METHODE 2

Vortraining 2
Versuchsdauer und Klimabelastung 2
Arbeitsbelastung 3
Messungen 3
Flüssigkeitsersatz 5
Angaben zur Versuchsperson 5

ERGEBNISSE 5

I. Die täglichen 4-Stundenschweißmengen ... 5
II. Die Arbeitsschweißverluste in ml/kg/h .. 9
III. Die Kerntemperaturen 12
IV. Die Sweat Response 14
V. Sweat Response und Kerntemperatur 17
VI. Die lokale Verteilung der Schweißsekretion 19

1. Absolute Schweißmengenbestimmungen der einzelnen Körperregionen 19

2. Relative Schweißmengenbestimmungen der einzelnen Körperregionen 21

VII. Der innere Temperaturgradient 26
VIII. Die Sackschweißmengen von Arm und Bein . 28

DISKUSSION 31

ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG DES AKKLIMATISATIONSVORGANGES UND SCHLUSS 43

LITERATURVERZEICHNIS 46

E I N L E I T U N G

Am Tropenmedizinischen Institut Tübingen konnte durch die Arbeiten von HÖFLER (1966[a,b,c]), 1967, 1968[a,b,c]) gezeigt werden, daß es bei der Akklimatisation an stark feuchte Hitze zu einer stärkeren Zunahme der Schweißproduktion an den verdunstungsbegünstigten Extremitäten (ASCHOFF 1958[a,b]), KERSLAKE 1963) kommt als am Körperstamm. Den eindrucksvollsten Nachweis dieses Akklimatisationsphänomens lieferte ein Versuch (LAASER 1968) im fünfwöchigen ununterbrochenen Klimakammeraufenthalt unter feuchtheißen Bedingungen (36,5° C und 69 % relative Luftfeuchte).

Im hier dargestellten Selbstversuch soll nun unter ähnlichen Versuchsbedingungen untersucht werden, ob es bei der Akklimatisation an verhältnismäßig trockene Hitze (41,4° C und 39 % relative Luftfeuchte) zu den gleichen Anpassungsvorgängen kommt. Der Daueraufenthalt in der Klimakammer erstreckte sich dabei auf einen Zeitraum von knapp fünf Wochen (33 Tage) und kann damit einen Beitrag zu den noch verhältnismäßig ungeklärten, langfristigen Akklimatisationsphänomenen liefern.

M E T H O D E

Vortraining

Dem Klimakammer-Daueraufenthalt ging ein fünftägiges Training voraus. Hierbei bestand dieselbe Arbeitsbelasung wie später unter der Hitzeakklimatisation; es herrschte jedoch normale Zimmertemperatur.

Versuchsdauer und Klimabelastung

Der Klimakammer-Daueraufenthalt erstreckte sich über einen Zeitraum von fast fünf Wochen (33 Tage). Nur am ersten und letzten Tag bestand ein feuchtwarmes Klima (Trockentemperatur 36,5° C und Feuchttemperatur 32,3° C entsprechend einer relativen Luftfeuchtigkeit von 74 %). Die Messungen dieser Tage und ihre Auswertung werden in einer eigenen Arbeit mitgeteilt (Al Samarai 1970). An den übrigen Tagen, und zwar vom 2. - 32. Tag, bestand ein trockenheißes Klima. Dabei wurde die Hitzebelastung für den Tag größer gehalten als für die Nacht. Von 8.00 - 19.00 Uhr betrug die durchschnittliche Trockentemperatur 41,4° C mit Schwankungen von ± 0,5° C und die durchschnittliche Feuchttemperatur 28,1° C mit Schwankungen von ± 1° C. Dies entspricht einer durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit von 39 %. Während der Nacht, und zwar zwischen 19.00 - 8.00 Uhr, wurde bei unveränderter relativer Feuchte die Trockentemperatur auf 36° C gesenkt. Tag und Nacht sorgte die Windmaschine der Klimakammer für ein gleichmäßiges Raumklima. Die Windgeschwindigkeit betrug durchschnittlich 0,5 m/sec (beim Fahren in unmittelbarer Nähe der Versuchsperson mit Hitzdrahtmanometer gemessen).

Arbeitsbelastung

Die Arbeit bestand im Treten eines Fahrradergometers bei einer Leistung von 8 mkp/sec. Die gesamte Arbeit wurde auf vier Einzelarbeiten von je 50 Min. Dauer verteilt. Zwischen die Einzelarbeiten trat jeweils eine ca. 10 Min. lange Ruhepause. Jeweils vor der ersten Arbeit, meist zwischen 10.00 und 10.30 Uhr, wurden während einer halbstündigen Ruheperiode die Ausgangswerte gemessen.

Messungen

Alle fünf Minuten wurden folgende Messungen vorgenommen :

1. die Feucht- und Trockentemperaturen des Kammerklimas;

2. die Pulsfrequenz der Vp. mittels eines photoelektrischen Zählers am Ohr (Messungen hier nicht mitgeteilt);

3. die Hauttemperaturen von Stirnmitte, li. Handrücken, li. Brust und li. Oberschenkel mittels Thermoelementen.

Nach der Ruheperiode und nach den einzelnen Arbeiten wurde die Rektaltemperatur mit Hilfe eines gewöhnlichen Quecksilberthermometers auf $1/10^{\circ}$ C genau bestimmt.

Die während der Arbeiten am ganzen Körper erlittenen Schweißverluste wurden aus der Differenz des Körpergewichtes berechnet, das vor und nach jeder Arbeit mit einer medizinischen Waage bestimmt wurde. Die Wägungen wurden an der unbekleideten Vp. auf

50 g genau vorgenommen.

Die regionale Verteilung der Schweißsekretion wurde in Anlehnung an die Methode von WEINER (1945) bestimmt. Im Anschluß an die 4. Arbeit wurde sie in den beiden ersten Versuchswochen täglich gemessen, in der restlichen Zeit nur jeden zweiten Arbeitstag. Hierzu wurden auf der Haut 18 Plexiglasringe von 4 cm Durchmesser und 2 cm Höhe befestigt, die Temperatur der eingeschlossenen Haut gemessen, die Hautareale getrocknet und die Ringe mit Parafilm-"M"-Folie für 6 Min. luftdicht abgeschlossen. Der in dieser Zeit gebildete Schweiß wurde dann mit abgewogenen Wattebäuschchen von den Hautarealen gesammelt. Aus der Gewichtszunahme der Wattetupfer errechnete sich die pro Flächen- und Zeiteinheit von dem Hautbezirk sezernierte Schweißmenge. Um zu repräsentativen Schweißwerten für die Körperbezirke Kopf, Stamm, Arm und Bein zu kommen, genügte es bereits, an 10 Körperstellen lokale Schweißmessungen vorzunehmen (BEN JELLOUN 1969, HÖFLER 1968[b]). Die 18 Kapseln waren in meinem Versuch an folgenden Stellen angebracht:

> Stirn, Wange, li. seitliche Halsregion, re. Schulterblatt, unterhalb der li. Brustwarze, seitliche Thoraxregion unterhalb der re. Achsel und über dem Rippenbogen (li.), re. seitlicher Unterbauch, Innen- und Außenseite des li. Ober- und Unterarms, Innen- und Außenseite des li. Ober- und Unterschenkels und ventrale und dorsale Seite des Oberschenkels.

Die Größe der Körperfläche beträgt - berechnet nach DUBOIS (1915) - 18.239 cm^2 (Arme: 3.423 cm^2, Kopf: 1.141 cm^2, Stamm: 6.503 cm^2 und Beine: 7.172 cm^2).

Die vom re. Unterarm und Unterschenkel während der

1. und 4. Arbeit sezernierten Schweißmengen wurden in Plastiksäcken gesammelt, die knapp unterhalb des Ellenbogens bzw. Knies mit breiten Gummilitzen abgebunden waren. Die Mengenbestimmung erfolgte in einem Meßzylinder.

Flüssigkeitsersatz

Die im Verlauf einer Arbeit dem Körper durch das Schwitzen verlorengegangene Flüssigkeitsmenge wurde während der folgenden Arbeit durch Trinken entsprechender Mengen an Tee, Limonade und Coca-Cola voll ersetzt, so daß stets eine ausgeglichene Flüssigkeitsbilanz bestand.

Angaben zur Versuchsperson

27jähriger Mitteleuropäer von 176 cm Körpergröße und 75 kg Körpergewicht, dunkelhaarig. Selbstversuch.

E R G E B N I S S E

I. Die täglichen 4-Stundenschweißmengen

In den ersten drei Versuchswochen kommt es zu einem geringen Anstieg der 4-Stundenschweißproduktion: Der Mittelwert der 3. Woche von 3.140 ml liegt um nur 12 % über dem der 1. Woche von 2.780 ml. Deutlicher wird die Zunahme bei Gegenüberstellung des Minimums vom 2. Tag (2.530 ml) und des Maximums vom 21. Tag (3.420 ml = +890 ml). Für die Zeit des Schweißmengenanstiegs vom 2. bis zum 19. Tag ist in Abb. 1 die Regressionsgerade[1)]

---

1) Als Signifikanzniveau wurde durchweg $\alpha = 0{,}05$ gewählt.

mit ihrem Schwerpunkt Sp1 und ihrer Gleichung dargestellt. φ_1 und somit auch β_1 unterscheiden sich signifikant von Null. Die Schweißproduktionszunahme von $tg\varphi_1 = 0{,}280$ entspricht einem täglichen Anstieg um 28,0 ml.

Für die Zeit der Schweißmengenabnahme, und zwar vom 21. Tag bis zum 32. und letzten Versuchstag, ist die zweite Regressionsgleichung aufgestellt, und die zugehörige Gerade mit ihrem Schwerpunkt Sp2 eingezeichnet (Abb. 1). φ_2 und somit auch β_2 unterscheiden sich signifikant von Null. Die Schweißproduktionsabnahme von $tg\varphi_2 = 0{,}311$ entspricht einem täglichen Schweißmengenabfall von 31,1 ml. In den Mittelwerten der 4. und 5. Woche von 3.200 ml bzw. 3.050 ml kommt die leichte Schweißproduktionsabnahme ebenfalls zum Ausdruck. Die Mittelwerte der 3. und 4. Woche unterscheiden sich dagegen nur geringfügig (3.150 ml bzw. 3.200 ml).

Die 4-Stundenschweißmengen, die aus den Kapselwerten der "Schweißverteilung" errechnet wurden, zeigen mit starken Schwankungen einen ganz ähnlichen zeitlichen Verlauf, nur kommt es hier erst in der 5. Woche zu einer Wiederabnahme (Abb. 2).

VERSUCH A/S

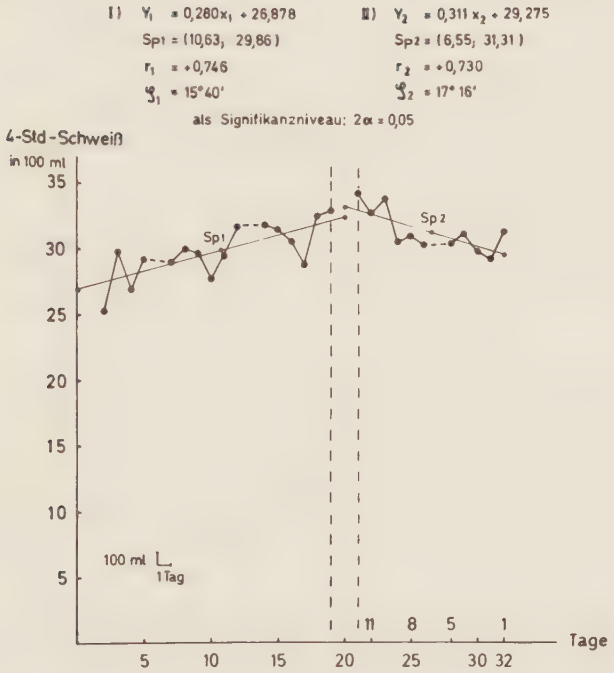

Abb. 1 : Zeitlicher Verlauf der 4-Stundenschweißmengen mit den Regressionsgeraden und -gleichungen für den Schweißproduktionsanstieg vom 2. bis 19. Tag und den Schweißproduktionsabfall vom 21. bis 32. Tag (Sp = Schwerpunkt, r = linearer Regressionskoeffizient, φ = Neigungswinkel der Regressionsgeraden).

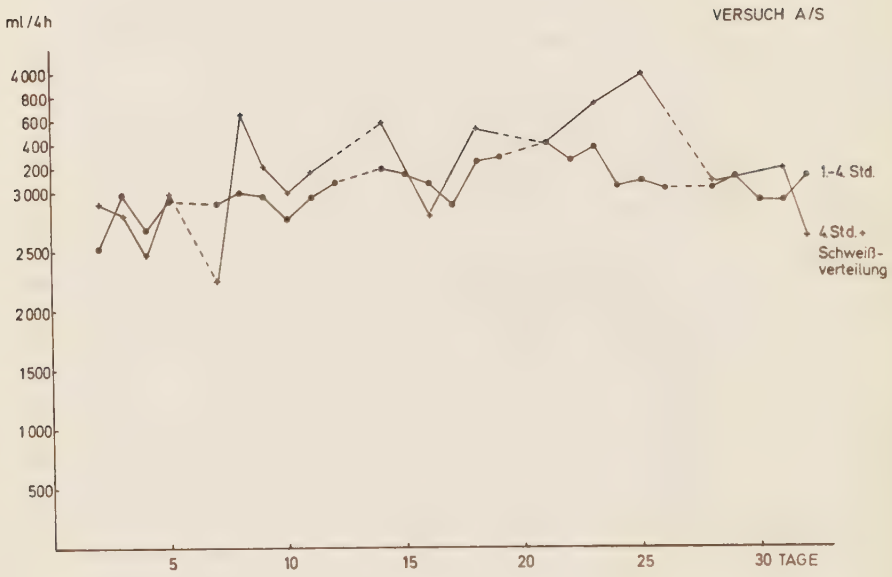

Abb. 2 : 4-Stundenschweißmengen im Verlauf des Versuches,

a. errechnet aus den Gewichtsverlusten aller 4 Arbeitsstunden (Symbol: Punkt);

b. errechnet aus der Schweißverteilungsbestimmung nach der 4. Arbeit (Symbol: Kreuz).

II. Die Arbeitsschweißverluste in ml/kg/h

Nach Umrechnung der während der vier Arbeitsperioden erlittenen Schweißverluste auf ml/kg/h ergab sich das Diagramm der Abb. 3. Bei Betrachtung der Schweißwerte der einzelnen Arbeitsphasen in ihrem zeitlichen Verlauf fallen folgende, zum Teil schon aus dem 4-Stundenschweißverlust bekannte Eigenheiten auf :

1. ein allgemeiner, leichter Anstieg der Schweißraten von der 1. bis zur 3. und 4. Versuchswoche, der sich in seiner Deutlichkeit von Arbeit zu Arbeit verringert;

2. ein leichter Abfall der Schweißraten von der 4. zur 5. Woche, der mit den Arbeiten abnimmt.

ad 1. Unter Zugrundelegung der Wochenmittelwerte beträgt der Anstieg bis zur 4. Versuchswoche für

A1 ca. 25 % (von 9,1 auf 11,3 ml/kg/h)
A2 ca. 15 % (von 9,0 auf 10,4 ml/kg/h)
A3 ca. 7 % (von 9,4 auf 10,1 ml/kg/h)
A4 ca. 3 % (von 9,6 auf 9,9 ml/kg/h)

ad 2. Zusammengenommen weisen die beiden ersten Arbeiten von der 4. zur 5. Woche einen gut doppelt so großen Abfall auf wie die beiden letzten Arbeiten zusammen (Differenz der Wochenmittelwerte 1,7 und 0,8 ml/kg/h).

Beim Vergleich der Schweißraten der vier Arbeiten untereinander von einer Woche zur anderen fallen folgende Besonderheiten auf :

1. Während die Schweißraten in der 1. Woche von der 1. zur 4. Arbeit gemäß den Wochenmittelwerten ansteigen, fallen sie von der 2. bis 5. Woche mit den Arbeiten.

2. Am Zustandekommen dieses Abfalls von der 1. zur 4. Arbeit sind die einzelnen Arbeitsschweißmengen in einem unterschiedlichen Ausmaß beteiligt:

   a. Während der Schweißproduktionsabfall von A_1 nach A_2 im Verlauf der letzten vier Wochen zunimmt,

   b. verringert er sich zwischen A_2 und A_4 bis zum Versuchsende auf ein Minimum.

Verfolgt man dies an den Wochenmittelwerten, so ergeben sich folgende Zahlen :

ad 1. Auf den Schweißratenanstieg von 9,1 auf 9,6 ml/kg/h während der 1. Woche von der 1. zur 4. Arbeit folgt eine maximale Abnahme während der 2. Woche von 10,3 auf 8,5 ml/kg/h. Dieser Abfall von 1,8 ml verringert sich auf 1,1, 1,4 und 1,0 ml/kg/h in den restlichen drei Versuchswochen.

ad 2a. Nach der 2. Versuchswoche mit einer zu vernachlässigenden Differenz zwischen den Schweißwerten von A_1 und A_2 kommt es zu einem Schweißratenabfall von 0,6, 1,0 und 0,9 ml/kg/h (zwischen A_1 und A_2) in der 3., 4. und 5. Versuchswoche.

ad 2b. Der Schweißratenabfall zwischen der 2. und 4. Arbeit verringert sich in den letzten vier Versuchswochen von 0,9 über 0,5 und 0,4 auf ein Minimum von 0,1 ml/kg/h in der 5. Woche.

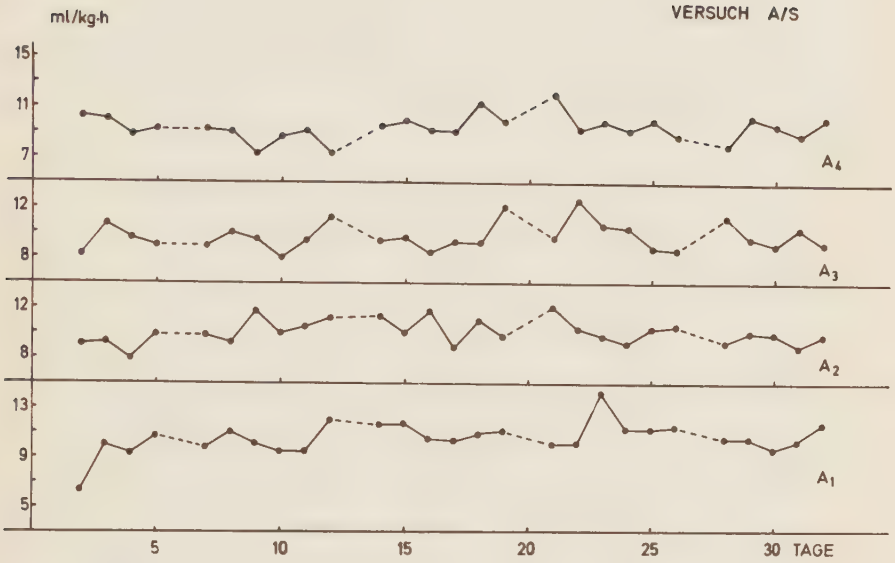

Abb. 3 : Schweißproduktion während der 1. bis 4. Arbeit im Verlauf des Versuchs.

III. Die Kerntemperaturen

Die anschließend an die Ruheperiode und die vier Arbeitsphasen gemessenen Rektaltemperaturen ergaben die Kurvenverläufe der Abb. 4. Außer dem allgemeinen Temperaturabfall während der Versuchsdauer fallen folgende Einzelheiten auf :

1. ein maximaler Abfall der Kerntemperaturen aller Arbeiten in der Anfangsphase des Versuchs :
   a. vom 1. auf den 2. Tag für die Arbeiten 3 und 4
   b. zum Beginn der 2. Versuchswoche für die Arbeiten 1 und 2 (Die Arbeiten 3.und 4 zeigen hier einen zweiten Temperaturabfall, der geringer als der der ersten Tage ist.);
2. ein leichter von A_1 bis A_4 sich verstärkender Anstieg der Temperaturen am Ende der 2. und um das Ende der 3. Woche;
3. ein von A_1 bis A_4 sich verdeutlichender Abfall der Rektaltemperaturen von der 4. zur 5. Versuchswoche auf einen gemeinsamen Endwert von $37,6^{\circ}$ C im Wochenmittel (lediglich A_2: $37,7^{\circ}$ C);
4. ein leichter, linearer Abfall der Ruhetemperatur (Mittelwerte der 1. und 5. Woche: $37,1^{\circ}$ C bzw. $36,7^{\circ}$ C);
5. eine ab der 2. Woche mit dem Ruhetemperaturabfall synchrone Abnahme der nach der 1. Arbeit gemessenen Rektaltemperaturen und infolgedessen ein ab dieser Zeit gleichbleibender Temperaturanstieg von $0,9^{\circ}$ C während der 1. Arbeitsperiode (lediglich $1,0^{\circ}$ C in der 4. Woche);

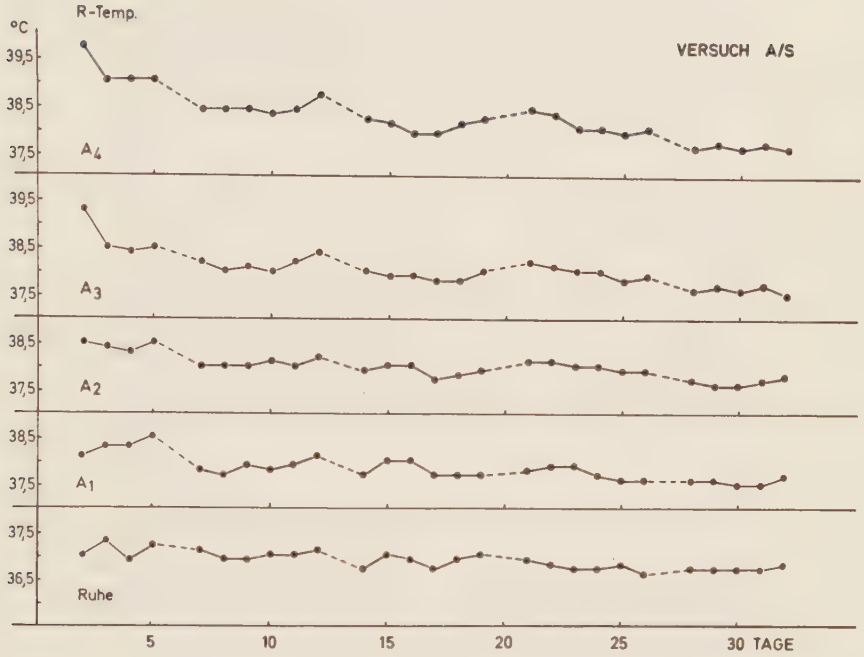

Abb. 4 : Zeitlicher Verlauf der Rektaltemperaturen vor Beginn der Arbeitszeit (Ruhe) und nach den vier Arbeitsperioden

6. ein mit der Versuchsdauer sich ständig verringernder Temperaturanstieg von A_2 bis A_4, so daß die Wochenmittelwerte der Rektaltemperaturen in der 3. und 4. Versuchswoche für die Arbeiten 2 bis 4 gemeinsam bei 38,0° C ± 0,1° C liegen und schließlich in der 5. Woche der Temperaturanstieg von der 1. zur 4. Arbeit erstmalig 0° C beträgt.

IV. Die Sweat Response

Die Sweat Response gibt Auskunft über die Größe der Schweißproduktion in Abhängigkeit zu deren stärkstem Stimulus, dem Kerntemperaturanstieg. Die Abb. 5 gibt die Schweißantworten der vier Arbeitsstunden in ml-Schweißmenge pro 1° C Anstieg der Rektaltemperatur und Stunde wieder.

Das Auffallendste am Verhalten der Sweat Response während des Versuchs ist der gemeinsame Anstieg der vier Stundenwerte auf einen Mittelwert für die fünfte und letzte Versuchswoche, der zwischen 850 und 1.000 ml/° C liegt. Dieser Anstieg erfolgt für die einzelnen Arbeitsstunden:

1. von einer unterschiedlichen Ausgangsbasis
2. mit unterschiedlicher Geschwindigkeit

ad 1. Der SR-Mittelwert der 1. Woche fällt von der 1. bis 3. Stunde von 600 auf 540 ml geringfügig ab und stürzt dann in der 4. Stunde auf einen Tiefstwert von 390 ml/h/° C.

ad 2. In den beiden ersten Arbeitsstunden erreichen die SR-Werte bereits in der 2. Woche ihren Endwert :

Die SR der 1. Stunde hält sich von der zweiten bis zur letzten Woche auf einem Wochenmittelwert von 1.000 $\pm$ 20 ml.

Die SR der 2. Stunde stellt sich auf einen Wochenmittelwert von 850 $\pm$ 30 ml/h/^{o} C ein (ausgenommen der SR-Mittelwert der 4. Woche mit 700 ml).

Ganz anders ist das Verhalten der SR-Werte der beiden letzten Stunden :

Sie steigen bis Versuchsende an und liegen erst in der 5. Woche bei einem Mittelwert von 900 ml/h/^{o} C. Von diesem Anstieg ist nur die 4. Woche ausgenommen: Ihr SR-Mittelwert ist in der 3. und 4. Arbeitsstunde um gut 100 ml niedriger als in der Vorwoche.

Man kann diese Ergebnisse folgendermaßen zusammenfassen :

Gemeinsamer Anstieg der Sweat Response auf einen maximalen Wert zwischen 850 und 1.000 ml/h pro ^{o} C (Wochenmittelwerte) in der 5. Woche. Die Ausgangsbasis des Anstiegs ist um so niedriger bzw. dieser um so langsamer, je fortgeschrittener die Arbeitsstundenzahl ist.

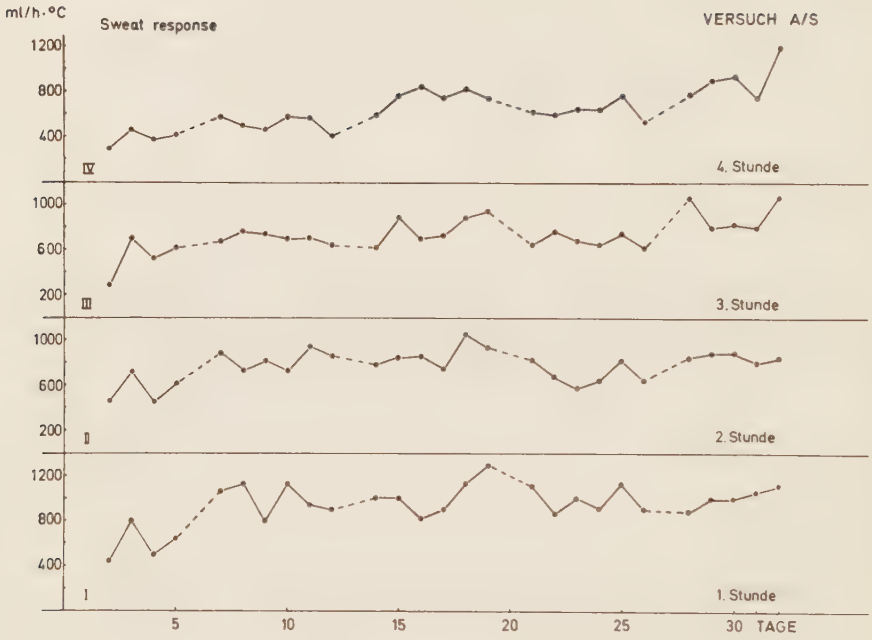

Abb. 5 : Die Sweat Response der 1. bis 4. Arbeitsstunde im Verlauf des Versuchs

V. Sweat Response und Kerntemperatur

Die Zunahme der Akklimatisation ist an dem Größenpaar: Sweat Response/Rektaltemperatur in Abb. 6 gut erkenntlich. Der Bereich der niedrigen Sweat Response-Werte und hohen Rektaltemperaturen wird schon während der 1. Woche rasch verlassen und die Meßwerte konzentrieren sich mit forschreitender Versuchsdauer immer mehr in dem diagonal gelegenen Bezirk der hohen SR-Raten und niedrigen Rektaltemperaturen. Dabei verringert sich bis zur 5. Versuchswoche der anfangs erhebliche Akklimatisationsvorsprung der 1. Arbeit gegenüber der 4. Arbeit auf eine Plusdifferenz von lediglich 100 ml/h/^{o} C Sweat Response bei nun gleicher Kerntemperatur.

Die SR-RT-Größenpaare (Wochenmittelwerte) betragen :

in der 1. Woche	für A_1	600/38,3	für A_4	400/39,2
in der 3. Woche	für A_1	1000/37,8	für A_4	750/38,1
in der 5. Woche	für A_1	1000/37,6	für A_4	900/37,6

(Die Maßeinheiten sind ml/h/^{o} C)

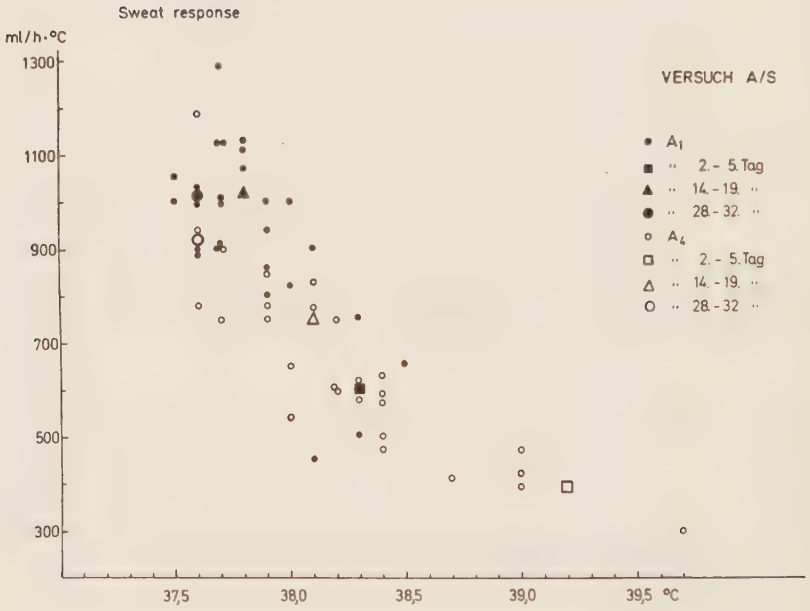

Abb. 6 : Die Sweat Response der 1. Arbeit (dunkle Kreise) und 4. Arbeit (helle Kreise) in Bezug zur jeweiligen Kerntemperatur im Verlauf des Versuches. Die Mittelwerte der 1., 3. und 5. Woche wurden mit eigenen Symbolen eingetragen.

VI. Die lokale Verteilung der Schweißsekretion

1. Absolute Schweißmengenbestimmungen der einzelnen Körperregionen

Die von den Körperregionen Kopf, Stamm, Arm und Bein auf einem Hautareal von 100 cm^2/min produzierten Schweißmengen sind aus Abb. 7 zu ersehen. Die Werte der 1. Woche liegen für Kopf, Arm und Bein durchschnittlich bei ca. 60 mg/100 cm^2/min. Nur der Stamm liegt mit 71 mg/100 cm^2/min deutlich über diesem Niveau. Wie bereits die 4-Stundenschweißmengen der Kapselwerte erwarten lassen (Abb. 2), so zeigt sich auch hier ein allgemeiner Schweißmengenanstieg bis in die 4. Woche. Nach der Reihenfolge seiner Stärke geordnet, tritt der Anstieg an Arm, Kopf, Stamm und Bein auf. Dabei beträgt der Anstieg des Armes ca. 70 % auf 100 mg/100 cm^2/min, der des Kopfes und des Stammes ca. 20 % und der des Beines ca. 10 % (entsprechend den Mittelwerten aus der 1. und der 3./4. Woche zusammen). Von dem Schweißmengenabfall der 5. Woche ist die Kopfregion ausgenommen. In der Reihenfolge seiner Stärke tritt er an Arm, Bein und Stamm auf.

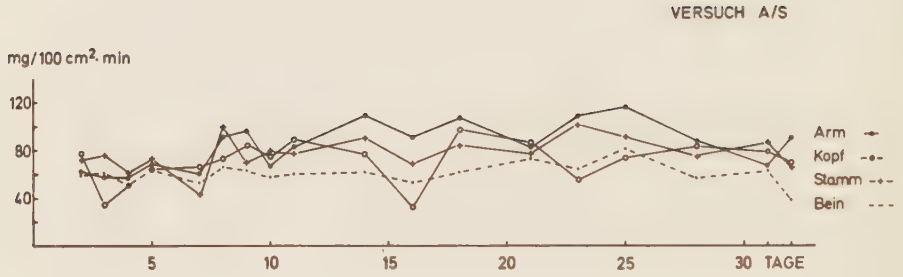

Abb. 7 : Schweißproduktion der Körperregionen Arm, Kopf, Stamm und Bein im Verlauf des Versuches

2. Relative Schweißmengenbestimmungen der einzelnen Körperregionen

In den Abb. 8 a und b, 9 und 10 sind die prozentualen Schweißmengen dargestellt, mit welchen sich die Körperregionen Kopf, Stamm, Arme und Beine während des Akklimatisationsversuches an der gesamten Körperschweißproduktion beteiligen. Die Werte ergeben sich aus der Schweißverteilungsbestimmung (Abb. 2 und 7).

Die Körperteile Kopf und Stamm, die dem Wärmekern nahe liegen (ASCHOFF 1958[b]), zeigen ein auffallend uniformes Verhalten (Abb. 8a). Der geringfügige Anstieg ihrer prozentualen Schweißmengenanteile während des Versuches kann vernachlässigt werden. Die Werte des Stammes streuen in der 2. Woche am stärksten um den durchschnittlichen Wert von 38,3 %. Die Schwankungen um den Mittelwert des Kopfes von 6,3 % sind geringfügig.

Die Extremitäten, die Körperperipherie darstellend und als Wärmeeffektoren gekennzeichnet (ASCHOFF 1958[a]), verhalten sich anders: Sie ändern ihre Schweißanteile im Laufe der Akklimatisation, doch wider Erwarten in gegensinniger Weise: Die Schweißanteile des Beines fallen in etwa um den gleichen Betrag, um den sich die Schweißwerte des Armes erhöhen (b_{Bein} = 0,21 %/Tag und b_{Arm} = 0,17 %/Tag, Abb. 8a).

In Abb. 8b und 9 sind gemeinsam die vier prozentualen Anteile von Kopf, Stamm, Armen und Beinen an der Gesamtschweißproduktion in unterschiedlicher Zusammenfassung der einzelnen Körperregionen in zwei Diagrammen dargestellt. Die angegebenen Schweißmengenanteile leiten sich von den Korrelationsgeraden der Abb. 8a ab. Das Diagramm der Abb. 9 zeigt deut-

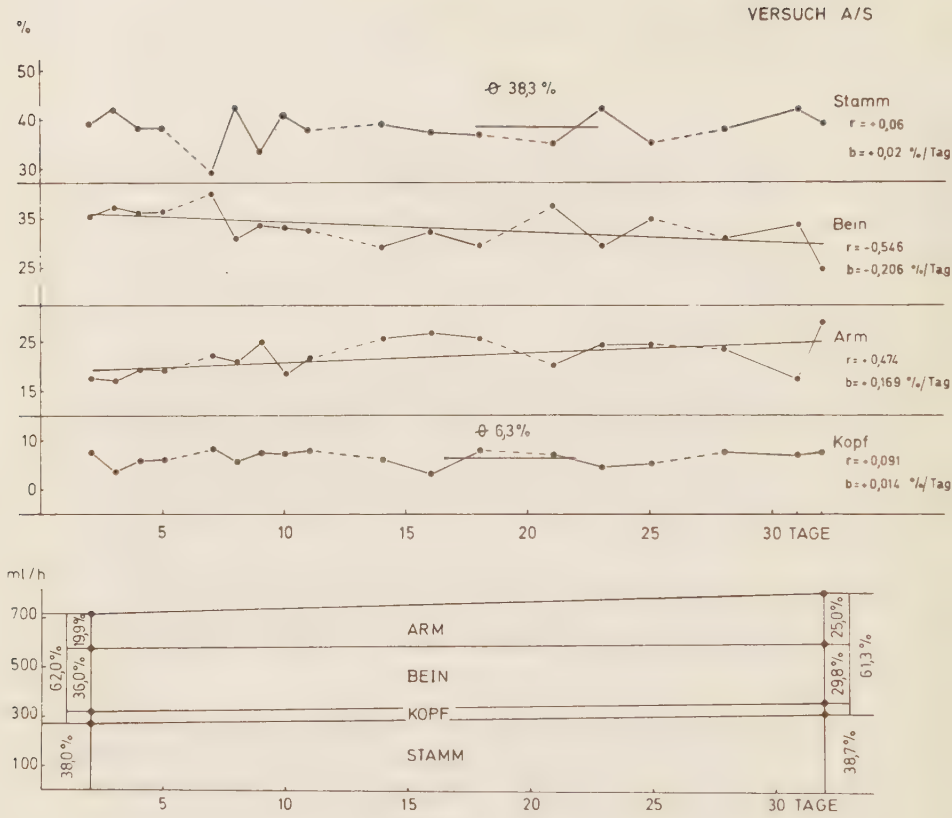

Abb. 8 a (oben) : Prozentuale Anteile der einzelnen Körperregionen an der Gesamtschweißmenge im Verlauf des Versuches mit den zugehörigen Korrelationsgeraden (r = linearer Korrelationskoeffizient, b = Neigungsmaß)

Abb. 8 b (unten): Zeitlicher Verlauf der prozentualen Anteile von Kopf, Stamm, Armen und Beinen an der Gesamtschweißmenge gemäß der Korrelationsberechnung. Es wurden die Körperregionen Arme, Beine und Kopf gegenüber dem Stamm eigens zusammengefaßt.

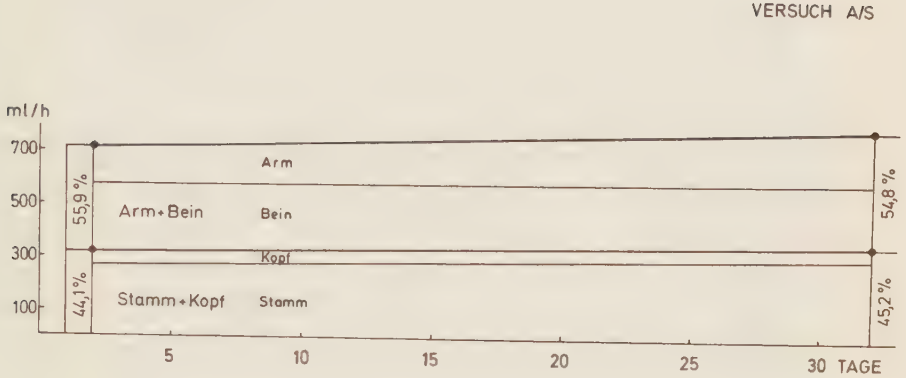

Abb. 9 : Prozentuale Beteiligung von Armen und Beinen bzw. Kopf und Stamm an der Gesamtschweißmenge während des Versuches (gemäß der Korrelationsberechnung, s. Abb. 8a)

lich, daß es während des Akklimatisationsversuches zu keiner schwerpunktmäßigen Verlagerung des Schwitzens auf die Extremitäten gekommen ist, sondern sowohl Stamm und Kopf als auch Arme und Beine ihren prozentualen Anteil an der Gesamtschweißmenge von Versuchsbeginn bis -ende im wesentlichen beibehalten haben. In Abb. 8b wurde der Kopf wegen seiner günstigeren Verdunstungsbedingungen nicht dem Stamm sondern den Extremitäten zugeordnet. Das Diagramm zeigt, daß auch für diese regionale Zusammenfassung von Arm, Bein und Kopf die Werte von Versuchsbeginn bis -ende so gut wie gleichbleiben (62 % bzw. 61,3 %).

In Abb. 10 läßt sich das prozentuale Schweißmengenverhältnis zwischen den einzelnen Körperteilen am besten überblicken:

Der Kopf schwitzt erwartungsgemäß mit durchschnittlich 6 % der Gesamtschweißmenge in allen fünf Wochen am wenigsten, der Stamm mit durchschnittlich 38 % in allen 5 Versuchswochen am meisten. Die Beine vermögen in der ersten Woche fast so viel zu schwitzen wie der Stamm: Die Differenz beträgt für diese Zeit lediglich 2 % - 3 %. Ab der zweiten Woche jedoch fallen die Beinwerte deutlich unter die Stammwerte. Die Arme beteiligen sich in der ersten Woche mit durchschnittlich 20 % an der Gesamtschweißmenge und vermögen trotz ihres Anstiegs bis auf durchschnittlich 25 % in der letzten Woche die bis dahin auf durchschnittlich 30 % abgesunkenen Beinwerte nicht zu erreichen. Die in diesem und dem folgenden Abschnitt angegebenen Werte gehen aus den Korrelationsberechnungen, s. Abb. 8a, hervor.

Bei dieser Betrachtung drängt sich ein Vergleich mit den prozentualen Oberflächenanteilen der besprochenen Körperregionen auf. Die Oberflächen- und Schweißproduktionsanteile von jeweils 6 % sind während der

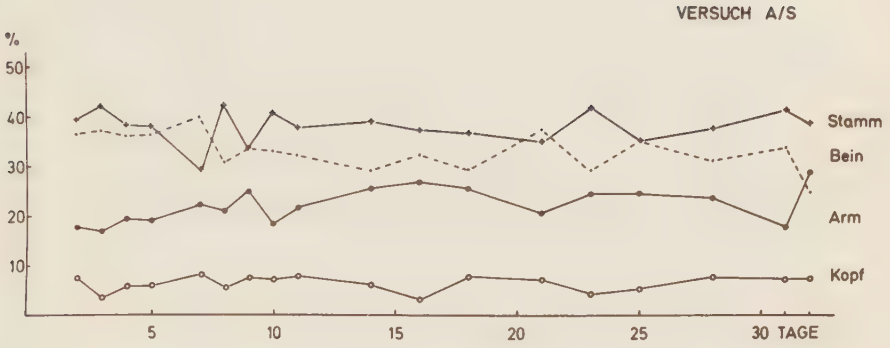

Abb. 10 : Prozentuale Anteile der einzelnen Körperregionen an der Gesamtschweißmenge im Verlauf des Versuches

ganzen Versuchsdauer für den Kopf fast gleich groß. Das gleiche gilt für den Stamm mit einem Oberflächenanteil von 36 % und einem Schweißanteil von durchschnittlich 38,3 %. Auch für die Extremitäten besteht in der ersten Versuchswoche eine gute Übereinstimmung: Die Oberflächenanteile betragen für den Arm und das Bein 19 % bzw. 39 %, die Schweißanteile 18 % bzw. 36 %. Im Laufe des Versuches verschlechtert sich jedoch dieses Verhältnis immer mehr: Der Schweißanteil des Armes liegt nach seinem Anstieg auf 25 % während der letzten Woche deutlich über seinem Oberflächenanteil von 19 %, der Anteil des Beines nach seinem Abfall auf 30 % bis zur fünften Woche weit unter seinem Oberflächenanteil von 39 %.

VII. Der innere Temperaturgradient

Der innere Temperaturgradient gibt Auskunft über das Temperaturgefälle, das zwischen der Rektaltemperatur und der in diesem Versuch stets niedrigeren "integralen" Hauttemperatur bestand. Die "integrale" Hauttemperatur ergibt sich bei Berücksichtigung der Temperaturen der einzelnen Hautareale entsprechend ihrem Oberflächenanteil. Der in Abb. 11 dargestellte innere Temperaturgradient errechnet sich aus den Mittelwerten sämtlicher während der vier Arbeitsstunden durchgeführten Rektal- und Hauttemperaturbestimmungen. Der i.TG hat am 2. Versuchstag ein Maximum von 2,6° C inne und fällt bis Ende der 2. Woche (11. Tag) auf ein Minimum von 1,9° C ab. Abgesehen von der stärkeren Schwankung um den 20. Tag kommt es während der 3. Woche zu einem Anstieg auf einen durchschnittlichen Wert von 2,3° C und zu einem Niveau dieser Höhe bis Versuchsende.

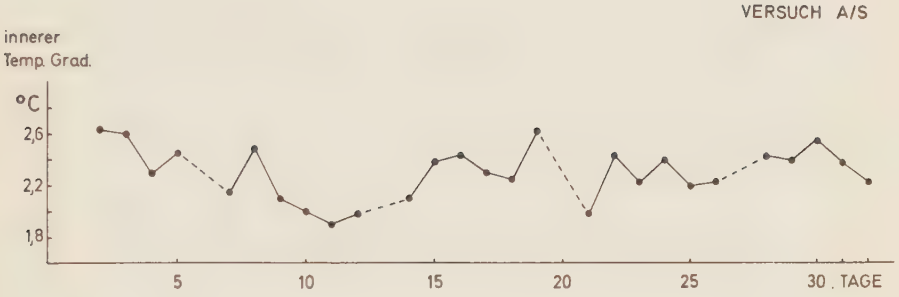

Abb. 11 : Innerer Temperaturgradient (Differenz der durchschnittlichen Kern- und Hauttemperaturen aller 4 Arbeiten) im Verlauf des Versuches

VIII. Die Sackschweißmengen von Arm und Bein

Die Sackschweißmengen, die während der 1. und 4. Arbeit von Unterarm und Unterschenkel (inkl. Hand bzw. Fuß) gesammelt wurden, sind in Abb. 12 dargestellt. Der grundlegende Unterschied zwischen diesen und den übrigen Schweißmengenbestimmungen besteht in dem hohen Wasserdampfdruck des Schweißsacks, gegen den die eingeschlossene Haut schwitzen mußte. Arm und Bein zeigen auch hier ein unterschiedliches Verhalten. So kommt es während der Akklimatisation am Arm:

1. zu einem wesentlich stärkeren Schweißproduktionsanstieg als am Bein und

2. zu einer viel stärker ausgeprägten Differenz der Schweißmengen der 1. und 4. Stunde.

ad 1. Der Sackschweißzunahme des Armes in der 1. und 4. Stunde von 200 % bzw. 400 % steht ein Anstieg des Beines von nur 50 % bzw. 80 % während des Versuches gegenüber (gemäß den Wochenmittelwerten).

ad 2a. In den ersten beiden Wochen liegen die Schweißmengen des Armsacks in der 4. Stunde um durchschnittlich mehr als 50 % unter den Werten der 1. Stunde. Nach der vorübergehenden Annäherung während der letzten vier Tage der 3. Woche gelingt es dem Arm, erst wieder ab Ende der 4. Woche annähernd so viel zu schwitzen wie während der 1. Arbeitsstunde.

b. Anders verhält sich das Bein:
Lediglich in den ersten beiden Versuchswochen sind die Werte der 4. Stunde etwas niedriger als während der ersten Arbeitsstunde. In den restlichen Wochen übersteigen sogar die Sackmengen der 4. Stunde etwas die Werte der ersten Arbeitsstunde.

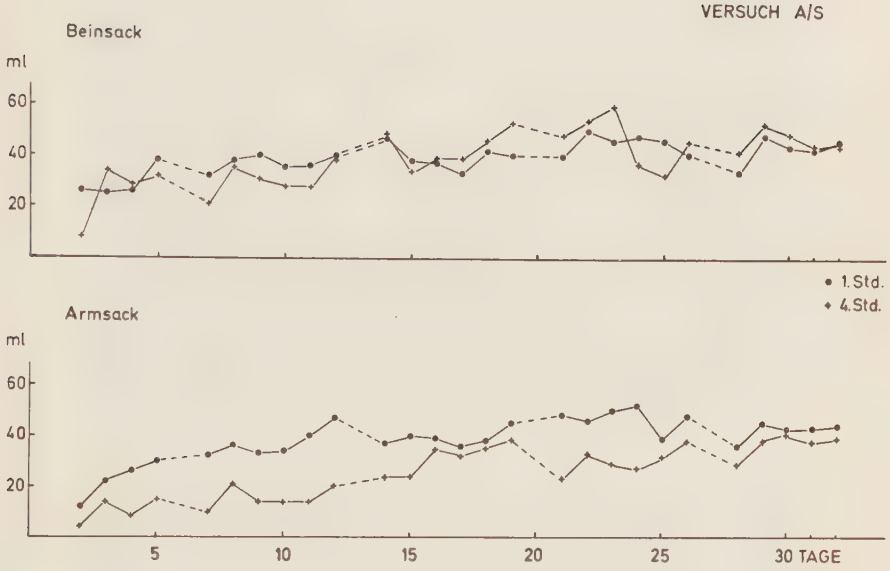

Abb. 12 : Sackschweißmengen der 1. und 4. Arbeitsstunde von Unterarm und Unterschenkel im Verlauf des Versuches

Gemeinsam gilt aber für beide Extremitäten :

1. Der Anstieg der Sackschweißmengen im Laufe der Akklimatisation ist wesentlich größer als der Anstieg der Gesamtschweißmenge der frei schwitzenden Haut.

2. Der Anstieg spielt sich zum größten Teil in den ersten drei Wochen ab.

3. Die Sackschweißmengen der 1. Stunde von Arm und Bein sind während der ganzen Versuchszeit abgesehen vom 2. Versuchstag so gut wie gleich groß, obwohl das Oberflächenverhältnis 4/7 beträgt (Unterarm + Hand/Unterschenkel + Fuß). Dagegen erreichen die Sackmengen des Armes während der 4. Stunde auch in der 5. Woche noch nicht die des Beines (Mittelwert des Arms 37 ml, des Beins 46 ml).

D I S K U S S I O N

Seit den Arbeiten von EICHNA e.a. (1945, 1950), GERKING und ROBINSON (1947), LADELL (1951), ROBINSON e.a. (1943) und TAYLOR e.a. (1943) gilt die Zunahme der Schweißproduktion als der entscheidende Akklimatisationsprozeß der kurzfristigen, zwei bis drei Wochen andauernden Hitzeanpassung. Es fiel dabei auf, daß diese Schweißzunahme in trockenheißem Klima wesentlich geringer ist als in feuchtheißem Klima (BELDING und HATCH 1963, FOX e.a. 1967, GERKING und ROBINSON 1947 und HÖFLER 1968[b,c]). Dementsprechend nahm in unserem Versuch die 4-Stundenschweißmenge bis zum 18. Tag täglich um durchschnittlich 28 ml zu, dagegen in dem feuchtheißem Parallelversuch von LAASER (1968) im gleichen Zeitraum um durchschnittlich etwas mehr als 100 ml/die.

Ein Vergleich mit diesem feuchtheißem Versuch ist deshalb besonders aufschlußreich für die Klärung des Unterschieds, der zwischen der Akklimatisation an trokkene und feuchte Hitze besteht, weil die Versuchsbedingungen vergleichbar waren. Beide Versuche dauerten fünf Wochen - als ununterbrochener Aufenthalt in der Klimakammer wohl einzig in der Literatur (LEITHEAD und LIND 1964) -. Die Arbeitsbelastung war in meinem Versuch etwas schwerer (50 min. statt 40 min. pro Arbeitsperiode), dafür war aber die Klimabelastung entsprechend leichter (41° C und 39 % rel. Feuchte in meinem Versuch gegenüber 36,5° C und 69 % rel. Feuchte im Parallelversuch). Die P4SR (predected-4-hour-sweat-rate), die einen der zuverlässigsten Maßstäbe für Hitze und Arbeitsbelastung am Akklimatisierten darstellt (HÖFLER 1968[c], LEITHEAD und LIND 1964), beträgt in meinem Versuch 3,3 l, in dem Parallelversuch bei feuchter Hit-

ze 3,2 l. Zur Überprüfung dieser Übereinstimmung können definitionsgemäß erst die 4-Stundenschweißmengen der 3./4. Woche verwendet werden, nachdem die Akklimatisation schon zum überwiegenden Teil abgelaufen ist (HÖFLER 1968[c]). Diese 4-Stundenwerte betragen ca. 3,2 l in meinem Versuch und 3,1 l in dem Versuch von LAASER (1968). Im noch weitgehend unakklimatisierten Zustand des 2. bis 5. Tages liegen die 4-Stundenschweißmengen meines Versuches dagegen durchschnittlich um mehr als 1 l über den Werten des feuchtheißen Parallelversuches. Bei gleichem P4SR führt also die bei trockenerer Hitze anfänglich größere Schweißproduktion im Laufe der Akklimatisation nicht auch zu höheren Endschweißwerten; sondern ein entsprechend geringerer Schweißproduktionsanstieg bei trockenerem Klima hat zur Folge, daß nach zwei bis drei Wochen unabhängig von der Feuchte bei gleichem P4SR gleiche 4-Stundenschweißmengen erzielt werden.

Die Ursache für die höheren Ausgangswerte der Schweißproduktion in trockener Hitze liegt an einem schwächeren Abfall der Schweißproduktion bei mehrstündiger Belastung (FOX e.a. 1967, ROBINSON und GERKING 1947). Die Werte der ersten Stunde wiesen dementsprechend noch keine größeren Unterschiede auf. Dagegen liegen die Werte der vierten Stunde während der ersten Woche bei trockener Hitze mit durchschnittlich 9,6 ml/kg/h um ca. 50 % über den Vergleichswerten des feuchtheißen Versuches.

Der genaue Mechanismus dieser Schweißproduktionsabnahme ist trotz zahlreicher experimenteller Befunde noch nicht völlig geklärt. Feststeht jedoch, daß es sich dabei nicht um einen zentralen Vorgang handelt (COLLINS und WEINER 1962, COLLINS e.a. 1963, FOX 1962[a]/64/67, THAYSSEN 1955), sondern um einen peripheren Mechanis-

mus, der sich an den Schweißdrüsen selbst abspielt. Dabei ist für das Absinken der Schweißmengen das Nachlassen der mittleren Schweißproduktion der Einzeldrüse entscheidender als die Verringerung der Zahl sezernierender Drüsen (THAYSSEN 1955). Eine Gruppe von Autoren GERKING und ROBINSON 1946, THAYSSEN 1955, WYNDHAM 1966) spricht in diesem Zusammenhang von Schweißdrüsenermüdung, eine andere von Schweißdrüsenokklusion. Auf einen der Ermüdung entsprechenden Vorgang scheinen folgende zwei Befunde hinzuweisen, und zwar der Glykogenschwund untrainierter Schweißdrüsen nach Hitzebelastung (DOBSON 1960, COLLINS e.a. 1966), und der während der Akklimatisation sinkende Laktatspiegel des Schweißes (WEINER und HEYNINGEN 1952). Auf der anderen Seite sprechen die Experimente von BROWN und SARGENT (1965), RANDALL und PEISS (1957), SARKANY e.a. (1965), SHELLEY (1954) für ein feuchtigkeitsbedingtes Zuschwellen der spiralig durch die Epidermis ziehenden Schweißdrüsen-Ausführungsgänge(EBBECKE 1951). Besonders schlüssig für diese Ansicht ist der Versuch von HERTIG e.a. (1961), der von BREBNER und KERSLAKE (1964) wiederholt wurde: Die in wässrige Na-Cl-Lösung getauchte Haut zeigt auch bei längerem Schwitzen keine Abnahme der Schweißmengen, wenn eine wenigstens 3fach-molare Konzentration verwendet und somit das Eindringen von Wasser in die Epidermis osmotisch verhindert wird. Obwohl die Mehrzahl der Autoren die feuchtigkeitsbedingte Verquellung der Schweißdrüsen-Ausführungsgänge als Ursache für das Nachlassen der Schweißproduktion nach längerem Schwitzen annimmt, bestehen doch experimentelle Befunde, die sich nicht mit der "simplen" Okklusionsansicht in Einklang bringen lassen (BREBNER und KERSLAKE 1963/64, COLLINS und WEINER 1962, FOX e.a. 1967, HERTIG e.a. 1961).

Interessanterweise steigen an den beiden ersten Tagen meines Versuches, an welchen man das stärkste Schweißdrüsenversagen im Verlauf der Arbeitszeit erwartet, die Schweißmengen von der ersten bis zur vierten Stunde an, und zwar auf Werte, die in der 4. Stunde deutlich über denjenigen der 2. Woche liegen (Abb. 3). Obwohl die Schweißdrüsen in der 2. Woche besser hitzeangepaßt sind als in der 1. Woche, finden sich die geringsten Schweißmengen der 4. Stunde und der stärkste Schweißproduktionsabfall während der Arbeitszeit in der zweiten Woche (gemäß den Einzel- und Wochenmittelwerten). Eine mögliche Erklärung bietet die Betrachtung der zugehörigen Kerntemperaturen (Abb. 4) : Sie steigen in der 1. Woche auf maximale Höhen und bewirken dadurch eine so starke Drüsenstimulation, daß die Schweißproduktion nicht entsprechend dem Versagensmechanismus absinken kann. Erst in der 2. Woche, nachdem der Hauptabfall der Kerntemperaturen erfolgt ist, kann das Schweißdrüsenversagen auch rein äußerlich an mit der Arbeitszeit sinkenden Schweißmengen zum Ausdruck kommen. Bei Belastung mit sehr feuchter Hitze hingegen ist das Drüsenversagen an den ersten Tagen so stark, daß ein Absinken der Schweißmengen während der Arbeitszeit auch nicht durch die maximal steigenden Kerntemperaturen verhindert werden kann. Später jedoch mit fortschreitender Akklimatisation und nachlassendem Drüsenversagen ab der 2. Woche scheint sich auch bei feuchtheißem Klima diese Gegenregulation der Kerntemperaturen auszuwirken: Das Schweißproduktionsmaximum liegt dann nicht mehr in der 1., sondern in der 2. Arbeitsstunde (LAASER 1968, STRYDOM e.a. 1966).

Die Verschleierung des Schweißdrüsenversagens aufgrund unterschiedlicher Temperaturstimulation (FOX e.a. 1963) läßt sich mit Hilfe der Sweat Response, Schweißproduktion/Kerntemperaturanstieg (LADELL 1951/55), ver-

meiden : Die Sweat Response ist in meinem Versuch in allen vier Stunden, also auch während der 4. Arbeit, von der 1. zur 2. Woche kräftig angestiegen (Abb. 5).

Ein Schweißdrüsenversagen, das in seiner Stärke der Akklimatisation an feuchte Hitze entspricht, besteht in den fast wasserdampfgesättigten Schweißsäcken meines sonst trockenheißen Versuches. In Übereinstimmung mit den Schweißsackversuchen der Literatur (COLLINS und WEINER 1962, FOX e.a. 1962[b]/64/67, HEYNINGEN und WEINER 1952, LAASER 1968, SCHMOLL 1966) ist dieses Drüsenversagen anfangs so groß, daß es im Laufe des Versuches zu einer Sackschweißproduktion vom Mehrfachen des Ausgangswertes kommen kann (Abb. 12). Für die Haut des Beines ist das Schweißdrüsenversagen bereits in der 3. Woche überwunden, für den Arm dagegen erst in der 5. Woche. Dies läßt sich an nicht mehr (Bein) oder fast nicht mehr (Arm) von der 1. auf die 4. Stunde absinkenden Sackschweißmengen erkennen und außerdem daran, daß die Sackschweißproduktion der 4. Stunde gleich groß (Arm) oder fast gleich groß (Bein) wird wie die Schweißproduktion in der Schweißverteilungsbestimmung.

Es ist nun interessant, daß in den Schweißsäcken d i e Extremität das stärkere Schweißdrüsenversagen und dessen langsamere Überwindung aufweist, die pro Oberflächeneinheit mehr schwitzt, und zwar der Arm. Denn die im Sack eingeschlossene Haut des Armes sezerniert während des ganzen Versuches in der 1. Stunde in etwa genauso viel wie die um 3/7 größere, eingeschlossene Haut des Beines. Unter Berücksichtigung der größeren Schweißdrüsendichte des Armes (THOMSON 1954) ergibt sich auch für die Einzeldrüse eine stärkere Schweißproduktion, die sich zu der des Beines wie 3 zu 2 verhält.

Ein Zusammenhang zwischen dem Versagen der Schweißdrüsen und deren vorausgegangenen Aktivität wurde auch in den Schweißsackexperimenten von COLLINS und WEINER (1962) beobachtet: Mit Atropin blockiert gewesene Drüsen zeigten im Gegensatz zu vorher aktiven eine unverminderte Schweißproduktion. Die Autoren sahen aber darin keinen Beweis für einen ermüdungsähnlichen Vorgang, sondern nahmen an, daß die Drüsenaktivität, auch unter den äußerst feuchten Bedingungen im Schweißsack, noch eine Zunahme der bereits bestehenden Hautverquellung und Schweißdrüsenokklusion verursachen kann.

Diese Ansicht könnte auch erklären, warum in meinen Schweißsackbestimmungen der von vornherein stärker schwitzende Arm einen wesentlich größeren Schweißproduktionsabfall von der 1. bis zur 4. Stunde aufweist als das (schwächer schwitzende) Bein und warum der Arm im Sack einen wesentlich stärkeren Anstieg der Schweißproduktion im Laufe des Versuchs erzielen kann als das Bein.

Bei der Betrachtung des Temperaturanstiegs während der Arbeitszeit fällt ein seit der 2. Woche gleichbleibender Anstieg von durchschnittlich 0,9° C während der 1. Arbeit auf (Abb. 4). Entsprechend konstant hält sich die Sweat Response der 1. Stunde (durchschnittlich 1.000 ml/h/° C, Abb. 5). Von der 2. bis 4. Arbeitsstunde dagegen verringert sich der Temperaturanstieg von anfänglich 1,6° C auf durchschnittlich 0° C in der letzten Versuchswoche. Es wird also in meinem trockenheißen Versuch wie auch in feuchter Hitze (LAASER, STRYDOM e.a. 1966) der gesamte Arbeitstemperaturanstieg im Verlauf der Akklimatisation zu einem immer größeren Anteil in die erste

Arbeitsstunde verlegt. Eine ausgeglichene Wärmebilanz tritt somit immer früher ein und kann schließlich nach guter Hitzeanpassung schon ab der 2. Arbeitsstunde erreicht werden (WILLIAMS e.a. 1967 und mein Versuch).

Das Ausbleiben des Temperaturanstieges nach der 2. Stunde ermöglicht in der 5. Woche meines Versuches erstmalig die Erhöhung der Sweat Response in den beiden letzten Arbeiten auf ein Niveau, welches die beiden ersten Arbeiten bereits seit der 2. Woche einnehmen. Es bedurfte also eines 5wöchigen Hitzetrainings, um während der beiden letzten Stunden den Akklimatisationsstand zu erreichen, den die beiden ersten Arbeiten bereits nach gut einer Woche innehatten.

Zu einer ausgeprägten, aber vorübergehenden Erniedrigung der Sweat Response kommt es in der 4. Woche vor allem während der letzten drei Arbeiten. Bei fast gleich großen, durchschnittlichen Stundenschweißmengen der 3. und 4. Woche (Abb. 3) ist dies vorwiegend eine Folge des stärkeren Kerntemperaturanstieges während der drei letzten Arbeitsstunden der 4. Woche. In dem feuchtheißen Parallelversuch führt ein noch stärkerer Arbeitstemperaturanstieg bei gleichbleibender Schweißproduktion in der 3./4. Woche zu einem Absturz aller vier Sweat Response-Stundenwerte auf ein Niveau, das dem Stand der 2. Woche entspricht. In der 3./4. Woche stellt sich also in unseren beiden Parallelversuchen ein Akklimatisationsverlust ein. JUNGMANN (1962) spricht von einer Anpassungskrise in der 3. Woche. In meinem sowie in einem erst kürzlich durchgeführten, auch trockenheißen Versuch (VAN ACKEREN 1970) unterstreichen die besondere Stellung dieses Zeitraumes für die Akklimatisation außerdem der Anstieg des inneren Tem-

peraturgradienten auf sein Endniveau (s. Abb. 11) und die wieder abnehmenden Gesamtschweißmengen (s. Abb. 1).

Die örtliche Umverteilung der Schweißproduktion auf die Extremitäten kann deshalb einen Akklimatisationsvorteil darstellen, weil bei den meisten Menschen im unakklimatisierten Zustand die Schweißproduktion der Extremitäten niedriger ist, als es ihrem Oberflächenanteil entspricht (HÖFLER 1968). Nach den Angaben von WEINER (1945) und unseren Werten (LAASER 1968, SCHMOLL 1966) liegt der Anteil der Extremitäten an der Gesamtschweißmenge zu Beginn der Akklimatisation zwischen 30 % und 40 %, während der durchschnittliche Oberflächenanteil der Extremitäten bei 60 % liegt. Darüber hinaus sind die Verdunstungsbedingungen der Extremitäten wegen ihres kleinen Krümmungsradius sogar noch besser, als es ihrem Verhältnis zur Oberfläche entspricht (ASCHOFF 1958, KERSLAKE 1963).

Dieses Mißverhältnis wirkt sich auf die Akklimatisation an sehr feuchte Hitze besonders nachteilig aus. Denn bei den hier bestehenden, ungünstigen Verdunstungsbedingungen wird die vorwiegend vom Stamm produzierte Schweißmenge, besonders nach der starken Zunahme der 1. Woche, nur noch unzureichend verdunstet: Ein Großteil tropft ab (HÖFLER 1968[c]). Mit einer weiteren Steigerung der Schweißproduktion des Stammes würde die verdunstende Schweißmenge nur in einem unverhältnismäßig geringen Ausmaß gegenüber der abtropfenden Schweißmenge ansteigen. Eine Schweißproduktionszunahme an den noch verhältnismäßig schwach schwitzenden Extremitäten kann dagegen die Schweißverdunstung noch beträchtlich steigern. Eine Verstärkung der evaporativen Körperküh-

lung ist auf diesem Wege nicht nur bei steigenden, sondern auch bei konstanten, ja selbst sogar bei abnehmenden Gesamtschweißmengen möglich.

Es war eine wesentliche Fragestellung dieses Versuches, ob es zu dieser örtlichen Umverteilung der Schweißproduktion auf die Extremitäten auch bei der Anpassung an trockene Hitze kommt. Das Klima war mit 41° C Trockentemperatur und 28° C Feuchttemperatur so gewählt, daß bei einer relativ geringen Beteiligung der Extremitäten an der Gesamtschweißproduktion von ca. 30 % - 40 % (Normalwert unakklimatisierter Vpn. s.o.) die zur Körperkühlung erforderliche Schweißmenge ohne Schwierigkeiten vorwiegend vom Stamm hätte verdunstet werden können. Der Vorteil der obengenannten Umverteilung hätte in diesem Fall lediglich in einer Zunahme des Quotienten von verdunsteter zu abgetropfter Schweißmenge bestanden. Damit hätte zwar die evaporative Körperkühlung bei gleichbleibender Gesamtschweißmenge gesteigert werden können;aber im Gegensatz zur schweren Belastung mit feuchter Hitze (LAASER, SCHMOLL) mußte in meinem Versuch dieser Vorteil nicht genutzt werden, um die für eine vollständige Akklimatisation nötige Schweißverdunstung zu ermöglichen. Es wurde deshalb unter diesen Umständen von vornherein nicht mit einer regionalen Umverteilung der Schweißproduktion auf die Extremitäten gerechnet. Der Versuch bestätigte diese Erwartung: Die Umverteilung blieb aus (Abb. 8 und 9).

Doch dieses Ergebnis ist wegen einer sudomotorischen Eigenart der Versuchsperson nicht ganz schlüssig. Die Extremitäten hatten nämlich von Anfang an einen Schweißproduktionsanteil, der ihrem Oberflächenanteil in etwa entsprach: 54 % gegenüber 58 % (Schweiß-/Oberflächenanteil). Das ist erstaunlicherweise eine bessere

Entsprechung als nach 3- bzw. 5wöchiger Akklimatisation an feuchte Hitze mit Hilfe des Umverteilungsprozesses erzielt werden konnte (SCHMOLL, LAASER): Die Schweißproduktionsanteile der Extremitäten am Ende dieser Versuche betrugen nur ca. 40 % - 50 % bei einem Oberflächenanteil von 62 % bzw. 60 %. Da aber die Verdunstungskapazität der Extremitäten deren Oberflächenanteil sogar noch übertrifft, wäre auch noch eine Umverteilung über diesen Anteil hinaus für die Akklimatisation sinnvoll, was ja in meinem Versuch am Arm eingetreten ist. Jedoch die gleichzeitige Abnahme des Schweißproduktionsanteiles des Beines unter seinen Oberflächenanteil machte in meinem Versuch diesen Vorteil für die Extremitäten in ihrer Gesamtheit wieder zunichte (Abb. 9). Da aber dieser Effekt bisher nicht einmal bei der Anpassung an stark feuchte Hitze genutzt wurde (LAASER, SCHMOLL), konnte das Ausbleiben dieses stärksten Grades der Umverteilung in meinem trockenheissen Versuch nicht erstaunen.

Das Fehlen einer örtlichen Umverteilung der Schweißproduktion auf die Extremitäten wirft aber in diesem Versuch, in dem es zur Abnahme der Gesamtschweißmenge in der 4./5. Woche kam (Abb. 1), eine wichtige Frage auf:

Wie die örtliche Umverteilung der Schweißproduktion so stellt die Abnahme der Gesamtschweißmenge ein langfristiges Akklimatisationsphänomen dar. Im Gegensatz zu den zahlreichen Beobachtungen, daß die Schweißproduktion nach einer Akklimatisationszeit von zwei bis drei Wochen nicht weiter zunimmt (HÖFLER 1967/68^{c}, LAASER 1968, ROBINSON e.a. 1943, SCHMOLL 1966, WYNDHAM 1952), gibt es in der Literatur nur eine sichere Mitteilung einer späteren Abnahme der anfänglich angestiegenen Schweißmengen, und zwar ab der 4. Woche der Hitzebelastung (MACPHERSON 1960). Das gleiche Verhalten konn-

te kürzlich noch bei einer 5wöchigen Belastung mit trockener Hitze an unserem Institut beobachtet werden, wobei Pulsfrequenz und Kerntemperatur erniedrigt blieben (VAN ACKEREN 1970). In meinem Versuch setzte sich die Verringerung der Kerntemperaturen und des Kerntemperaturanstiegs während der Arbeitszeit bei abnehmenden Gesamtschweißmengen sogar noch fort. Diesen Widerspruch glaubte man mit der obenangegebenen Umverteilung erklären zu können (FOX e.a. 1964, HÖFLER 1966^{c}/68^{c}). Da es aber in meinem Versuch nicht zu diesem Anpassungsmechanismus kam, muß ein Akklimatisationsgewinn bei gleichzeitig abnehmender Gesamtschweißmenge auch ohne die Umverteilung der Schweißproduktion auf die Extremitäten möglich sein. Doch auf welche Weise ist solch eine Regulation möglich?

Die bei länger dauernder Hitzebelastung eintretende Grundumsatzsenkung (KNIPPING 1923) bietet keine ausreichende Erklärung für dieses Geschehen, denn dieser Grundumsatzsenkung steht eine Steigerung der Wärmeaufnahme aus der Umgebung durch Konvektion und Strahlung (s.u.) gegenüber. Außerdem verringert sich mit der Dauer des Versuches die Grundumsatzsenkung selbst (STRYDOM e.a. 1966).

Soweit man das Verhalten von Kerntemperatur und Pulsfrequenz als Kriterien der stabilen Akklimatisation trotz wieder abnehmender Schweißmenge ansieht, käme als bisher nicht berücksichtigter Akklimatisationsprozeß auch eine Änderung der Durchblutungsverteilung zugunsten der Haut in Betracht (WILLIAMS e.a. 1967), die zur Folge hätte, daß ohne zusätzliche Herz-Kreislaufbelastung die Kernwärme zur Haut transportiert werden könnte. Da jedoch der innere Temperaturgradient (Abb. 9) in den letzten zwei Wochen bei noch geringfügig weiter sinkender Kerntemperatur (Abb. 3) konstant blieb, muß

die mittlere Hauttemperatur parallel zur Kerntemperatur ebenfalls noch etwas gefallen sein. Das bedeutet aber unter den gegebenen Klimaverhältnissen eine erhöhte Wärmeaufnahme durch Konvektion und Strahlung. Die evaporative Wärmeabgabe muß also trotz fallender Schweißmenge entsprechend zugenommen haben.

Eine solche, im Anteil der Körperteile an der Gesamtschweißmenge nicht zum Vorschein kommende "Ökonomisierung der Schweißproduktion" könnte durch eine mit unserer Methode nicht erfaßte, günstigere lokale Verteilung der Schweißsekretion an den einzelnen Körperteilen selbst bedingt sein (stärkere Sekretion höher liegender Abschnitte, deren nicht verdunsteter Schweiß die tieferen Abschnitte befeuchtet, THOMSON 1954).

Auch eine stärkere Beteiligung der Arme gegenüber den Beinen bei gleichbleibendem Gesamtanteil der Extremitäten könnte sich bei geeignetem Verhalten der Hauttemperaturen im Sinne eines günstigeren Verhältnisses von Verdunstung zu Schweißmenge auswirken. Direkte Messungen der lokalen Verdunstung mit gleichzeitiger Bestimmung der lokalen Schweißbildung wären daher wünschenswert (HÖFLER 1968[b]).

ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG DES AKKLIMATISATIONS-VORGANGES UND S C H L U S S

Der Akklimatisationsprozeß unter Arbeits- und Hitzebelastung läßt sich mit wenigen Worten folgendermaßen zusammenfassen:

Eine gleich große Schweißmenge wird bis zur Erlangung der vollständigen Hitzeanpassung bei einer immer niedrigeren Kerntemperatur und einem immer geringeren Kerntemperaturanstieg während der Arbeitsbelastung gebildet (WYNDHAM 1953 und 1967).

Ein während der Arbeitszeit abnehmender Kerntemperaturanstieg wird in den ersten zwei bis drei Wochen in erster Linie von einem nachlassenden Schweißdrüsenversagen und der daraus resultierenden Schweißproduktionszunahme ermöglicht. Dieser Prozeß - ausgeprägter bei feuchter als bei trockener Hitze - ist peripherer Natur und spielt sich an den Schweißdrüsen selbst ab (COLLINS e.a. 1966, FOX 1962^{a}/64).

Später nach der 3. Woche ist dieser Vorgang nicht mehr entscheidend für den weiteren Akklimatisationsgewinn, denn die Gesamtschweißmengen bleiben jetzt gleich oder fallen sogar ab. Die Verringerung des Arbeitstemperaturanstiegs wird jetzt durch eine wirksamere örtliche Verteilung der Schweißsekretion verursacht. Diese kommt bei feuchter Hitze durch eine stärkere Beteiligung der Extremitäten an der Gesamtschweißproduktion zustande, bei trockener Hitze aber wie in diesem Versuch durch einen noch ungeklärten Mechanismus.

Für die Senkung der Körpertemperaturen ist außer den angegebenen Akklimatisationsvorgängen noch die Senkung der Ruhekerntemperatur verantwortlich (WYNDHAM 1953). Diese ist in feuchter Hitze wesentlich größer als in trockener Hitze (EICHNA 1950, LAASER 1968, SCHMOLL 1966, WYNDHAM 1967).

Wenn nach FOX (1963) die Erniedrigung der Ruhekerntemperatur synchron mit der Senkung der Temperaturschwelle für den Schwitzbeginn verläuft, wäre dieser Prozeß nicht für die Senkung des Temperaturanstiegs während der Arbeitszeit mitverantwortlich zu machen.

Die Senkung der Ruhekerntemperatur und der Schwellentemperatur für den Schwitzbeginn ist im Gegensatz zum Nachlassen des Schweißdrüsenversagens ein rein zentraler Regulationsvorgang, sehr wahrscheinlich eine hypothalamische Sollwertverstellung (FOX e.a. 1964).

Bei Versuchsende lag der Arbeitstemperaturanstieg mit 0,9° C nur noch gering über dem normalen, physiologischen Temperaturanstieg von 0,6° C, der bei gleich schwerer Arbeit bei Zimmertemperatur oder leichter Hitzebelastung erfolgt (ASCHOFF 1960, NIELSEN 1938). Ob bei Fortsetzung des Versuchs unter stagnierenden oder sogar weiterhin leicht abnehmenden 4-Stundenschweißmengen eine weitere Senkung dieses Temperaturanstiegs hätte eintreten können, ist ungewiß. Folge eines solchen Temperaturabfalls wäre eine Erhöhung der Sweat Response. Nimmt man aber ein Absinken der Sweat Response bei Fortführung des Versuchs an, so müßte der Temperaturanstieg während der

Arbeitszeit sich wieder erhöhen oder bei weiter abnehmenden Schweißmengen wenigstens konstant bleiben.

Abschließend sei noch einmal auf ein bisher nicht geklärtes Ergebnis dieses trockenheißen Akklimatisationsversuches hingewiesen: das Fehlen einer örtlichen Umverteilung der Schweißproduktion auf die Extremitäten. Es muß weiteren Versuchen mit einem trockenheißen Klima vorbehalten bleiben, zu zeigen, ob Versuchspersonen, die unakklimatisiert eine geringere Extremitätenbeteiligung beim Schwitzen aufweisen, auch die örtliche Umverteilung auf die Extremitäten vermissen lassen. Wäre dies der Fall, so würde die örtliche Umverteilung der Schweißproduktion auf die Extremitäten eine Besonderheit der Akklimatisation an ein feuchtheißes Klima darstellen.

L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

1. ASCHOFF, J.: Die Extremitäten als Effektoren der physikalischen Temperaturregulation
Wien. Med. Wschr. 108, 404 - 9 (1958[a])

2. ASCHOFF, J., R. Wever: Kern und Schale im Wärmehaushalt des Menschen
Naturwiss. 45, 20 (1958[b])

3. ASCHOFF, J.: Wärmehaushalt
In: Lehrbuch der Physiologie des Menschen
Urban und Schwarzenberg, München-Berlin-Wien (1960)

4. BELDING, H.S., T.F. HATCH: Relation of skin temperature to acclimation and tolerance to heat
Fed. Proc. 22, 881 - 3 (1963)

5. BEN JELLOUN, M.: Diss. Tübingen 1969

6. BREBNER, D.F., D.Mc.K. KERSLAKE: The effect of soaking the skin in water on acclimatization produced by a subsequent heat exposure
J. Physiol. 166, 13 - 4 (1963)

7. BREBNER, D.F., D.Mc.K. KERSLAKE: The time course of the decline in sweating produced by wetting the skin
J. Physiol. (London) 175, 295 (1964)

8. BROWN, W.J., F. SARGENT: Hidromeiosis
Arch. Environ. Health 11, 442 - 53 (1965)

9. COLLINS, K.J., J.S. WEINER: Observations on arm-bag suppression of sweating and its relationship to thermal sweat gland "fatigue"
J. Physiol. (London) 161, 583 - 56 (1962)

10. COLLINS, K.J., G.W. CROCKFORD, J.S. WEINER: The role of glandular activity in the increased sweat response of heat acclimatization
J. Physiol. 196, 12 - 3 (1963)

11. COLLINS, K.J., G.W. CROCKFORD, J.S. WEINER: The local training effect of secretory activity on the response of eccrine sweat glands
J. Physiol. 184, 203 - 14 (1966)

12. DOBSON, R.L.: The effect of repeated episodes of profuse sweating on the human eccrine sweat glands
J. Invest. Derm. 35, 195 - 8 (1960)

13 DUBOIS, D., E.F. DUBOIS: The measurement of the surface of man
Arch. Int. Med. 15, 868 (1915)

14. EBBECKE, U.: Arbeitsweise der Schweißdrüsen und sudomotorischen Reflexe bei unmittelbarer Beobachtung mit Lupenvergrößerung
Pflüg. Arch. Physiol. 253, 333-50 (1951)

15. EICHNA, L.W., W.B. BEAN, W.F. ASHE, N. NELSON: Performance in relation to environmental temperature
Bull. Johns Hopkins Hosp. 76, 25 (1945)

16. EICHNA, L.W., CH.R. PARK, N. NELSON, S.M. HORVATH, E.D. PALMES: Thermal regulation during acclimatization in a hot, dry (desert type) environment
Amer. J. Physiol. 163, 585 (1950)

17. FOX, R.H., R. GOLDSMITH, I.F.G. HAMPTON, H.E. LEWIS: The mechanism of the increase in sweating capacity induced by heat acclimatization
J. Physiol. 162, 59 - 60 (1962)

18. FOX, R.H., J.W. JACK, D.J. KIDD, S. ROSENBAUM: Observations in climatic chamber
Army Personnel Research Committée, Med. Res. Conc., London, Rept. No. APRC 61, 25 (1962[a])

19. FOX, R.H., R. GOLDSMITH, D.J. KIDD, H.E. LEWIS: Blood flow and other thermoregulatory changes with acclimatization to heat
J. Physiol. 166, 548 - 62 (1963)

20. FOX, R.H., R. GOLDSMITH, I.F.G. HAMPTON, H.E. LEWIS: The nature of the increase in sweating capacity produced by heat acclimatization
J. Physiol. London 171, 368 - 76 (1964)

21. FOX, R.H., R. GOLDSMITH, I.F.G. HAMPTON, T.J. HUNT: Heat acclimatization by controlled hyperthermia in hot-dry and hot-wet climates
J. Appl. Physiol. 22(I), 39 - 46 (1967)

22. GERKING, S.D., S. ROBINSON: Decline in the rates of sweating of men working in severe heat
Amer. J. Physiol. 147, 370 - 8 (1946)

23. GERKING, S.D., S. ROBINSON: Thermal balance of man working in severe heat
Amer. J. Physiol. 149, 476 - 88 (1947)

24. HERTIG, B.A., M.L. RIEDESEL, H.S. BELDING: Sweating in hot baths. J. Appl. Physiol.
16, 647 - 51 (1961)

25. HEYNINGEN von, R.E., J.S. WEINER: A comparison of arm-bag sweat and body sweat
J. Physiol. 116, 395 - 403 (1952)

26. HÖFLER, W.: Verlauf der Hitzeakklimatisation in einem natürlichen tropischen Klima
Z. Tropenmed. Parasit. 17, 127 (1966[a])

27. HÖFLER, W.: Verhalten der Schweißsekretion bei der Akklimatisation in einem natürlichen tropischen Klima
Int. Z. angew. Physiol. 22, 317 (1966[b])

28. HÖFLER, W.: Anpassung im Tropenklima
Klimakammer-Feldversuche-Erfahrungen
3. Tagung Dtsch. Tropenmed. Ges. Hamburg 1967, Med. Klinik 63, 995 (1968[a])

29. HÖFLER, W.: Changes in the regional distribution of sweating during acclimatization to heat
J. Appl. Physiol. 23, 503 - 6 (1968[b])

30. HÖFLER, W.: Hitzeakklimatisation
Hippokrates 39, 517 - 24 (1968[c])

31. HÖFLER, W., D. SCHMOLL, R. VOIGT: Verteilung der Schweißsekretion auf der Körperoberfläche bei der Hitzeakklimatisation
Naturwiss. 53, 506 (1966[c])

32. HÖFLER, W., U. LAASER: Schweißmenge, Kerntemperaturanstieg und Höhe der Kerntemperatur bei der Hitzeakklimatisation
Pflüg. Arch. 297, S. R. 79 (1967)

33. JUNGMANN, H.: Untersuchungen zur Tropenakklimatisation an Schiffsbesatzungen
Z. Tropenmed. Parasit. 13, 137 - 58 (1962)

34. KERSLAKE, D.McK.: Errors arising from the use of mean heat exchange coefficients in the calculation of the heat exchange of a cylindrical body in a transverse wind - In: Temperature, its measurement and control in science and industry
Vol.III/3,183 - Reinhold, New York 1963

35. KNIPPING, H.W.: Beitrag zur Tropenphysiologie
Z. Biol. 78, 259 (1923)

36. LAASER, U.: Physiologische Reaktionen während eines fünfwöchigen Daueraufenthaltes in einem künstlichen feuchtheißen Klima
Diss. Tübingen 1968

37. LADELL, W.S.S.: Assessment of group acclimatization to heat and humidity
J. Physiol. 115, 296 (1951)

38. LADELL, W.S.S.: The decline in sweating with raised rectal temperature
J. Physiol. (London) 129, 8-9 P (1955)

39. LEHMANN, G.: Die Arbeitsfähigkeit des Menschen im tropischen Klima
Westdeutscher Verlag, Köln-Opladen 1965

40. LEITHEAD, C.S., A.R. LIND: Heat stress and heat disorders
Casell, London 1964

41. MACPHERSON, R.K.: Physiological response to hot environment
Med. Res. Counc. Spec. Rep. Ser.
No. 298, London 1960

42. NIELSEN, M.: Die Regulation der Körpertemperatur bei Muskelarbeit
Skand. Arch. Physiol. 79, 193 (1938)

43. RANDALL, W.C., C.N. PEISS: The relationship between skin hydration and the suppression of sweating
J. Invest. Dermatol. 28, 435 - 41 (1957)

44. ROBINSON, S., E.S. TURELL, H.S. BELDING, S.H. HORVATH: Rapid acclimatization to work in hot climates
Amer. J. Physiol. 140, 168 - 76 (1943)

45. SARKANY, I., S. SHUSTER, M.C. STAMMERS: Occlusion of the sweat pore by hydration
Brit. J. Dermatol. 77, 101 - (1965)

46. SCHMOLL, D.: Phasen der Akklimatisation an Hitzearbeit während eines dreiwöchigen Daueraufenthaltes in einem feuchtheißen Klima
Diss. Tübingen 1966

47. SHELLEY, W.B.: Experimental miliaria in man - V. The effect of poral closure on the secretory function of the eccrine sweat gland
J. Invest. Derm. 22, 267 - 71 (1954)

48. STRYDOM, N.B., C.H. WYNDHAM, C.G. WILLIMS, J.F. MORRISON, G.A.G. BREDALL, A.J.S. BENADE, M. von RAHDEN: Acclimatization to humid heat and the role of physical conditioning
J. Appl. Physiol. 21, 636 - 42 (1966)

49. TAYLOR, H.L., A.F. HENSCHEL, A. KEYS: Cardiovascular adjustment of men in rest and work during exposure to heat
Amer. J. Physiol. 139, 538 (1943)

50. THAYSEN, J.H., J.C. SCHWARTZ: Fatigue of sweat glands
J. Clin. Invest. 34, 1.719 - 25 (1955)

51. THOMSON, M.L.: A comparison between the number and the distribution of functioning eccrine sweat glands in Europeans and Africans
J. Physiol. (London) 123, 225 (1954)

Herrn Professor Dr. W. Höfler danke ich für das Thema dieser Arbeit, für die persönliche Hilfe bei der Durchführung des Versuches, für die stete Bereitschaft zu einem beratenden Gespräch und die dabei herrschende sachliche und freundliche Atmosphäre.

Herrn Professor Dr. H. J. Knüttgen, Direktor des Tropenmedizinischen Instituts der Universität Tübingen, danke ich für die Möglichkeit unerschwerten Arbeitens an seinem Institut und für die Zurverfügungstellung der Klimakammer, Bibliothek und der anderen Einrichtungen des Instituts.

Fräulein I. Hermann danke ich für die stete und gewissenhafte Hilfe bei der Durchführung des Versuchs, für die Versorgung in der Klimakammer, für die Mitarbeit bei der Auswertung der Ergebnisse und für die Anfertigung der Photographien.

Lebenslauf

Am 3. September 1940 wurde ich, Peter Schwemmlein, als Sohn des Dr. med. Ruben Schwemmlein und seiner Ehefrau Irmingard Schwemmlein, geb. Hebenstreit, in München geboren.

Von September 1946 bis Juli 1950 besuchte ich die Volksschule in München-Solln und von September 1950 bis Juli 1959 das Wittelsbacher Gymnasium in München

Im Oktober 1959 immatrikulierte ich mich an der Universität München für das Studium der Humanmedizin und legte dort nach fünf Semestern die ärztliche Vorprüfung ab. Die folgenden drei klinischen Semester studierte ich an der Universität Hamburg, an der Sorbonne und an der Universität Freiburg. Dort wurde mein Studium durch einen schweren Unfall unterbrochen. Ende 1963 setzte ich in München mein klinisches Studium fort und schloß es im April 1966 mit dem Staatsexamen ab. Im August 1966 begann ich meine Medizinalassistentenzeit und arbeitete an folgenden Kliniken und Instituten: Städtische Kinderklinik Regensburg, Marienkrankenhaus Amberg (chirurgische Abteilung), St. Josefskrankenhaus Regensburg (gynäk.-gebh. Abteilung), Tropenmedizinisches Institut der Universität Tübingen, Med. Universitätsklinik Tübingen und Patholog. Institut Tübingen.

Die Bestallung als Arzt wurde mir am 10.2.1969 in München erteilt.